

目 录

序言	iii
第一章 空间粒子辐射	1
§ 1.1 银河宇宙线	1
§ 1.2 太阳宇宙线	14
§ 1.3 太阳风	22
§ 1.4 磁层中的带电粒子	27
§ 1.5 空间 X 射线	38
§ 1.6 空间 γ 射线	48
§ 1.7 空间中子	57
参考文献	62
第二章 射线与物质的相互作用	75
§ 2.1 带电粒子与物质的相互作用	75
§ 2.2 X 和 γ 射线与物质的相互作用	86
§ 2.3 中子与物质的相互作用	94
参考文献	98
第三章 空间带电粒子的测量	99
§ 3.1 气体探测器在空间带电粒子测量中的应用	99
§ 3.2 半导体探测器在空间带电粒子测量中的应用	148
§ 3.3 闪烁探测器在空间带电粒子测量中的应用	199
§ 3.4 高能粒子探测	225
§ 3.5 低能粒子探测	238
§ 3.6 仪器的几何因子	261
参考文献	268
第四章 空间 X、 γ 射线的测量	276
§ 4.1 应用气体探测器测量空间 X、 γ 射线	277

§ 4.2 应用半导体探测器测量空间 X、 γ 射线	291
§ 4.3 应用闪烁探测器测量空间 X、 γ 射线	300
§ 4.4 测量空间 X、 γ 射线的其他探测器	317
参考文献	324
第五章 空间中子的测量	330
§ 5.1 空间中子探测的基本原理	331
§ 5.2 核反应法探测器	336
§ 5.3 反冲核法探测器	343
参考文献	357
第六章 探测器的标定	359
§ 6.1 实验室的标定	360
§ 6.2 飞行过程中的标定	371
§ 6.3 其他参量的标定	378
参考文献	379
第七章 宇宙线地面观测仪器	381
§ 7.1 补偿电离室	381
§ 7.2 计数管望远镜	392
§ 7.3 中子堆	402
§ 7.4 大型闪烁计数器望远镜	408
§ 7.5 超中子堆	410
§ 7.6 方向图	413
参考文献	418
附录 1 常用的物理常数	420
附录 2 质子动能—刚度换算表	422
附录 3 光致电离效率随高度的分布	423
附录 4 质子的电离损耗和射程与能量的关系	425
附录 5 电子的电离损耗和射程与能量的关系	435
附录 6 常用物质的 X 射线质量吸收系数	443
附录 7 常用物质的 γ 射线质量吸收系数(准直束)	444
附录 8 宽束 γ 射线在不同减弱倍数时的铅层厚度	446

第一章 空间粒子辐射

空间粒子辐射主要是指空间的带电粒子（银河宇宙线、太阳宇宙线、太阳风等离子体和磁层粒子等）、空间 X 射线（太阳 X 射线、宇宙 X 射线和极光带 X 射线）、空间 γ 射线（太阳 γ 射线、宇宙 γ 射线和大气中的 γ 射线）和空间中性粒子（太阳中子和大气中子，中性原子和分子，宇宙尘埃，本书只涉及中子）。我们就目前所了解的有关它们的性质和特点作一概要介绍。

§ 1.1 银河宇宙线

1.1.1 初级宇宙线

1. 成分

银河宇宙线是来自银河各个方向的高能带电粒子流，它的起源至今还不清楚。在地球大气层以外的宇宙线称为“初级宇宙线”，其成分主要是质子，其次是 α 粒子，以及少量的其他核成分。几十年来，人们利用不同手段对初级宇宙线成分作了大量观测，得到了它们的相对元素丰度^[1-3]。表 1.1 综合了近期的观测结果^[7]。最近 Klarman 等人^[8]利用第三个高能天文观测卫星（HEAO-3）测得了 $26 \leq Z \leq 40$ 的宇宙线核的相对丰度，而 Fowler 等人^[9]利用 Ariel-V 卫星的测量，推算了电荷 $34 \leq Z \leq 90$ 的超重宇宙线核的丰度谱，使表 1.1 的结果有了新的发展。

七十年代初，在测量低能宇宙线重离子时，揭示出一种新

表1.1 初级宇宙线中的元素丰度 (归一化到氦=100)

Z	核	能量 100— 300兆电子伏/核子	能量 >850 兆电子伏/核子	宇宙线源	太阳系
1	H	11500±17	—	4.7×10 ⁴	1.5×10 ⁵
2	He	4020±576	—	2430	1.03×10 ⁴
3	Li	22±4	16.7±0.7	—	2.3×10 ⁻⁴
4	Be	11±2	9.7±0.5	—	3.8×10 ⁻⁵
5	B	30±5	30.5±0.9	—	1.6×10 ⁻⁵
6	C	115±11	114.0±2.0	94±2	54.9
7	N	25±3	27.5±0.9	10±2	17.4
8	O	100	100	100	100
9	F	2.1±0.6	1.3±0.2	—	1.1×10 ⁻³
10	Ne	15±2	17.8±0.7	15±2	16
11	Na	3.4±0.8	2.9±0.3	0.8±0.4	0.3
12	Mg	20±2	20.6±0.7	22±1	4.9
13	Al	3.9±0.7	2.6±0.3	2±1	0.4
14	Si	14±2	13.6±0.6	19±3	4.7
15	P	1.0±0.2	0.45±0.11	0.2 ^{+0.4} -0.2	4.5×10 ⁻²
16	S	2.7±0.3	3.5±0.3	2.8±0.6	2.3
17	Cl	0.4±0.2	0.56±0.12	—	2.65×10 ⁻²
18	Ar	1.2±0.3	1.3±0.2	0.7±0.5	0.55
19	K	0.8±0.5	1.2±0.2	0.4±0.2	1.95×10 ⁻²
20	Ca	2.1±0.5	2.6±0.25	2.1±0.7	0.3
21	Sc	0.4±0.2	0.4±0.11	—	1.6×10 ⁻⁴
22	Ti	2.2±0.6	1.4±0.2	—	1.29×10 ⁻³
23	V	0.9±0.5	0.5±0.12	—	1.2×10 ⁻³
24	Cr	2.8±1.8	1.07±0.18	0.3±0.3	5.9×10 ⁻²
25	Mn	—	0.85±0.16	0.2 ^{+0.4} -0.2	4.3×10 ⁻²
26	Fe	12.9±1.8	10.5±0.5	19±3	3.9
27	Co	—	0.39±0.1	—	1.0×10 ⁻²
28	Ni	—	0.44±0.11	0.8±0.2	0.22

的宇宙线成分，其能量范围在2—30兆电子伏/核子之间。它的特点是既不同于银河宇宙线的高能成分，又不同于太阳宇

宙线，故称为宇宙线的低能异常成分^[7,10,11]。同高能银河宇宙线相比，异常成分中的 O, N 和 Ne 的丰度相对 C 增高 5—10 倍，通常银河宇宙线中氧、碳之比大约为 1，在太阳宇宙线中 $O/C \approx 1.6$ ，而在异常成分中 $O/C \approx 10$ 。

外此的初级银河宇宙线中还有电子，它的强度仅是相同能量质子强度，百分之几^[1,12-14]。

2. 强度

初级宇宙线的强度变化不大，而且基本上是各向同性的，在太阳活动极小年宇宙线的强度约 4 个粒子/厘米²·秒^[2]。宇宙线强度随太阳活动略有变化，太阳活动极大年时的强度比极小年减小约一倍，即宇宙线的强度受太阳的调制。

随着深空探测技术的发展，已测量到宇宙线强度随远离太阳而略有增加，即存在宇宙线强度的径向梯度，平均每天文单位为 2.8% (直到 22 个天文单位)^[15-17]。对于宇宙线的异常成分，其径向梯度要大些，对氮粒子每天文单位约增加 12%，对氧粒子每天文单位约增加 20%^[7]。

3. 同位素

近十年来，宇宙线同位素的测量得到了迅速的发展，多数的测量结果都在每个核子数兆电子伏到数百兆电子伏的能量范围。表 1.2 综合了这些测量结果^[18-25]。

1.1.2 次级宇宙线

1. 次级成分

高能银河宇宙线进入地球大气层时，它和大气中的原子核发生碰撞，引起核的分裂，产生一系列其他粒子，通过这些粒子与周围物质的相互作用及自身的转变，形成宇宙线的

表 1.2 宇宙线同位素成分

同位素比值	能量范围(兆电子伏/核子)	观测的比值	参考文献
$^7\text{Be}/\text{Be}$	46—135	0.585 ± 0.026	[21]
$^9\text{Be}/\text{Be}$	46—135	0.376 ± 0.025	[21]
$^{10}\text{Be}/\text{Be}$	46—135	0.039 ± 0.014	[21]
$^{10}\text{B}/\text{B}$	33—107	$0.19 \begin{smallmatrix} +0.11 \\ -0.05 \end{smallmatrix}$	[20]
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	100—300	0.07 ± 0.006	[22]
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	30—126	$0.052 \begin{smallmatrix} +0.029 \\ -0.011 \end{smallmatrix}$	[20]
	5—30	≤ 0.11	[20]
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	30—132	0.63 ± 0.17	[20]
	5—30	$0.11 \begin{smallmatrix} +0.19 \\ -0.11 \end{smallmatrix}$	[20]
$^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$	100—300	$0.019 \begin{smallmatrix} +0.004 \\ -0.003 \end{smallmatrix}$	[22]
	30—148	$0.01 \begin{smallmatrix} +0.02 \\ -0.01 \end{smallmatrix}$	[20]
	6—30	≤ 0.03	[20]
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	100—300	$0.019 \begin{smallmatrix} +0.002 \\ -0.002 \end{smallmatrix}$	[22]
	30—148	$0.018 \begin{smallmatrix} +0.017 \\ -0.006 \end{smallmatrix}$	[20]
	6—30	≤ 0.03	[20]
$^{21}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$	100—300	$0.25 \begin{smallmatrix} +0.05 \\ -0.04 \end{smallmatrix}$	[22]
$^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$	100—300	$0.67 \begin{smallmatrix} +0.1 \\ -0.07 \end{smallmatrix}$	[22]
	78—169	$0.49 \begin{smallmatrix} +0.39 \\ -0.11 \end{smallmatrix}$	[20]
	5—28	≤ 0.36	[20]
$^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$	100—300	$0.28 \begin{smallmatrix} +0.04 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	[22]
$^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$	100—300	$0.30 \begin{smallmatrix} +0.04 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	[22]
$^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$	100—300	$0.109 \begin{smallmatrix} +0.024 \\ -0.014 \end{smallmatrix}$	[22]
$^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$	100—300	$0.084 \begin{smallmatrix} +0.020 \\ -0.014 \end{smallmatrix}$	[22]

次级成分。其中一半以上是 μ 介子，这部分射线穿透本领很大，能透入深水或地下，称为“硬成分”，或者叫“介子成分”；另一部分主要是电子和光子，它们的穿透本领很小，称为“软成分”，或叫“电磁成分”；第三部分是核成分，包括大气中子和质子。宇宙线与大气相互作用发生的过程如图 1.1 所示。

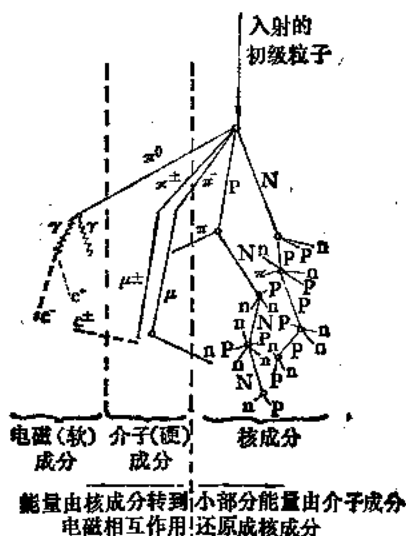


图 1.1 宇宙线与大气相互作用过程概略图 (N、P 为高能核子，n、p 为原子核分裂的低能核子)

2. 强度随高度的分布

由于原始宇宙线在大气中产生了次级成分，因此在大量产生次级粒子的大气深度处，宇宙线的总强度将增加。到达一定大气深度以后，由于大气吸收效应超过次级粒子的增殖效应，因此总强度又逐渐减小。当高度大于 50 公里时，由于大气密度减小，所以宇宙线的总强度与初级宇宙线差不多，图 1.2 就是在磁纬 41°N 处用火箭测量的结果^[3,5]。在磁纬

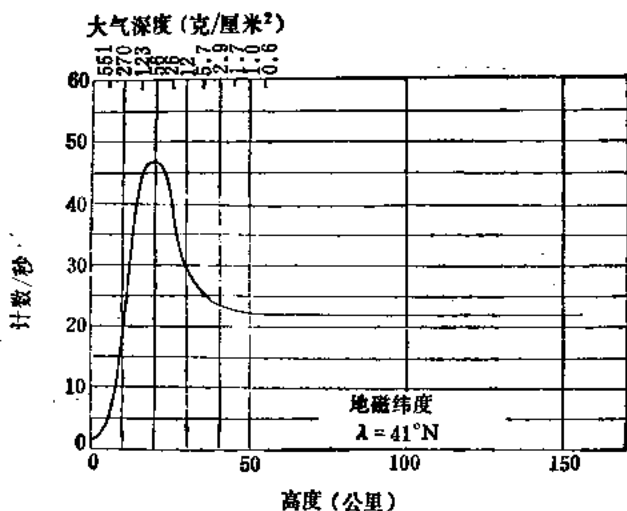


图1.2 银河宇宙线总强度随高度的变化

50°N 海平面，宇宙线的总强度约 1.79×10^{-2} 个粒子/厘米²·秒，其中硬成分的强度约为 1.27×10^{-2} 个粒子/厘米²·秒，软成分的强度约为 0.52×10^{-2} 个粒子/厘米²·秒^[2,5]。

3. 宇宙线对大气的电离

宇宙线对大气的电离效应主要发生在40—100公里之间，它是电离层D层的一个重要电离源。它对D层的电离贡献在50—70公里之间更明显，常称为D₀层，也叫宇宙线层^[26,27]。此外，宇宙线还是大气层中一氧化氮的源，特别是在20公里左右的高度，它是NO的一个重要源。

在宇宙线同大气相互作用的过程中还产生许多放射性核，如地球大气中的¹⁴C、³He、¹⁰Be等。表1.3给出了宇宙线在大气中产生的主要放射性同位素和它们的全球含量^[1]。尽

表 1.3 宇宙线产生的放射性同位素

同位素	半衰期	对流层	总的大气	全球含量
${}^3\text{He}$	稳定	6.7×10^{-2}	2×10^{-1}	3200吨
${}^{10}\text{B}$	2.5×10^6 年	1.5×10^{-2}	4.5×10^{-2}	430吨
${}^{26}\text{Al}$	7.6×10^5 年	3.8×10^{-3}	1.4×10^{-4}	1.1吨
${}^{36}\text{Cl}$	3.1×10^5 年	4×10^{-4}	1.1×10^{-3}	15吨
${}^{14}\text{C}$	5730年	1.1×10^0	2.5×10^0	75吨
${}^{32}\text{Si}$	500年	5.2×10^{-6}	1.6×10^{-4}	1.4千克
${}^3\text{H}$	12.5年	8.4×10^{-2}	2.5×10^{-1}	3.5千克
${}^{22}\text{Na}$	2.6年	2.4×10^{-5}	8.6×10^{-6}	1.9千克
${}^{35}\text{S}$	87天	4.9×10^{-4}	1.4×10^{-3}	4.5克
${}^7\text{Be}$	53天	2.7×10^{-2}	8.1×10^{-2}	3.2克
${}^{31}\text{P}$	25天	2.2×10^{-4}	6.8×10^{-4}	0.6克
${}^{32}\text{P}$	14.3天	2.7×10^{-4}	8.1×10^{-4}	0.4克

管许多放射性同位素在全球的产额是非常小的（每年几克到几千克），但是，已经证明它们在不同地球物理过程的研究中是有用的。

1.1.3 宇宙线的地磁效应

在远离地球的空间，银河宇宙线基本上是各向同性的。由于宇宙线是带电粒子，所以当它进入地磁场的作用范围后，它的路径将被磁场弯曲。地磁场对宇宙线粒子的偏转作用，使得能量较低的粒子完全到达不了地球表面，在低纬度更是如此，从而显示出空间分布的不均匀性和各向异性，这一现象称为地磁效应。它表现为宇宙线强度的纬度效应、经度效应、东西不对称性及南北不对称性等^[3,5,28,29]。

为了用同一尺度来描述宇宙线各种粒子贯穿磁场的的能力，常引用磁刚度 R 这个量，它是表征粒子的运动轨道受地磁场偏转程度的物理量，它是粒子动量 p 与粒子电荷 Ze 的比，

即

$$R = \frac{pc}{Ze} \quad (1-1)$$

式中 c 为光速, e 为电子电荷, Z 为粒子电荷数。动量 p 以千兆伏/ c 表示, 则刚度 R 的单位为千兆伏 (1 千兆伏 = 10^3 兆伏)。

对于地磁场中任一给定的观测点和给定的入射方向, 宇宙线粒子从无穷远处沿该方向到达此点的充分必要条件是, 其刚度必须大于某临界值 R_c , R_c 称为截止刚度。在中心偶极磁场的近似下, R_c 可用下式表示^[3,6]:

$$R_c = \frac{59.6 \cos^4 \lambda}{r^2} \left[1 + \sqrt{1 - \cos \theta \cos^3 \lambda} \right]^{-2} \quad (1-2)$$

式中 r 为考察点离地心的距离, 以地球半径为量度单位, λ 为考察点的地磁纬度, θ 为粒子入射方向与西方的夹角。

由公式 (1-2) 可以看出, 当 r 和 θ 一定时, R_c 随 λ 增加而减小, 即到达观测点的宇宙线强度随 λ 而增加。一般说来, 在赤道附近宇宙线强度最弱, 而在极区最强。宇宙线强度从赤道到磁纬 60° 左右增加比较明显, 但到 60° 以上变化就不显著了, 进入了所谓的“膝盖区”。地磁纬度效应如图 1.3 所示。

1.1.4 宇宙线的能谱

1. 重离子能谱

银河宇宙线的能谱对各种重离子大都是一致的, 在很宽的能量范围内 (10^8 — 10^{18} 电子伏) 可用一幂定律表示^[30]。微分能谱可写为:

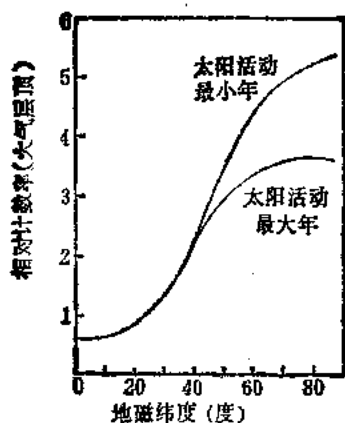


图 1.3 银河宇宙线的地磁纬度效应

$$\frac{dJ_i(E)}{dE} = A_i E^{-\alpha_i} \quad (\text{厘米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{球面度} \cdot \text{千兆电子伏})^{-1} \quad (1-3)$$

积分能谱可写为

$$J_i(>E) = C_i E^{-\gamma_i} \quad (\text{厘米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{球面度})^{-1} \quad (1-4)$$

式中 E 为粒子能量，单位以千兆电子伏表示， A_i 和 C_i 为尺度参数， α_i 和 γ_i 为能谱指数，通常有 $1.4 \leq \gamma_i \leq 2.2$ ， $5 \times 10^3 \leq C_i \leq 10^7$ 。

若用刚度来表示，则微分刚度谱可写为^[31]

$$\frac{dJ_i(>R_c)}{dR} = K_i R^{-\nu_i} \quad (\text{厘米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{球面度} \cdot \text{千积兆伏})^{-1} \quad (1-5)$$

分刚度谱为

$$J_i(>R_c) = K_i \frac{R^{1-\nu_i}}{\nu_i - 1} \quad (\text{厘米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{球面度})^{-1} \quad (1-6)$$

低能宇宙线的能谱同高能不一样，低能异常成分更是如此。Meyer⁽³²⁾给出了测量的质子和 α 粒子的一个完整能谱，如图 1.4 所示。

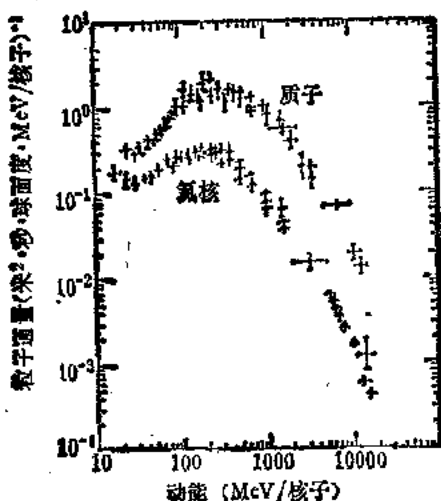


图 1.4 宇宙线质子和 α 粒子的能谱

2. 电子能谱

初级宇宙线中的电子和正电子近来已获得了许多测量结果，在 500 兆电子伏—3.5 千兆电子伏之间的电子微分谱可以表示为⁽³⁰⁾：

$$\frac{dJ(E)}{dE} = 11 \times E^{-1.6} (\text{米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{球面度} \cdot \text{千兆电子伏})^{-1} \quad (1-7)$$

电子能量在 $3 \leq E_e \leq 100$ 千兆电子伏范围的积分谱可写为⁽¹³⁾

$$J(>E_e) = 53 E_e^{-1.9 \pm 0.1} (\text{米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{球面度})^{-1} \quad (1-8)$$

从低能到高能的一个完整电子能谱如图 1.5 所示^(32,33)。其中有大约 30—40% 是正电子，它的强度随能量增加而减小。

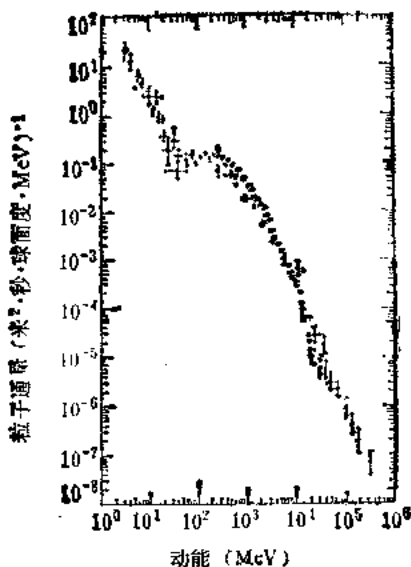


图 1.5 宇宙线电子的能谱

1.1.5 宇宙线的强度时间变化

宇宙线的强度时间变化分周期性的和非周期性的变化^[6, 34-56]。前者如半日变化、太阳日变化、27天变化、11年和22年变化等，后者如太阳耀斑时的宇宙线增加、宇宙线暴（Forbush 下降）等。这些变化都是受太阳和行星际电磁状态的调制而引起的，故常称为调制效应。现就几种主要的变化简述如下：

1. 太阳日变化

银河宇宙线强度的日变化，就硬成分而言，其变化幅度在0.1—0.3%之间，最大值的时间在中午附近。强度的日变化与地磁纬度、经度有关，与观测点的高度、入射粒子的方

向有关，与地球物理及太阳物理现象有关^[42]。日变化与能量的关系可表为：

$$\frac{\delta J(E)}{J(E)} = \begin{cases} 0.155E^{-1.0}, & E \geq E_{\min} \\ 0, & E \leq E_{\min} \end{cases} \quad (1-9)$$

式中 $E_{\min} = 10-15$ 千兆电子伏，软成分的日变化幅度要比硬成分大50%左右^[34]。

2.27天变化

宇宙线强度具有27天变化，其变化幅度在0.1—10%之间。它与粒子成分、地磁纬度、观测仪器的高度有关，也与太阳活动及地磁扰动有关。比如在1957年7月至1958年1月的观测中，平流层中的变化幅度约2.5%，海平面中子堆约1%，电离室约0.2—0.3%。这些表明，宇宙线的27天变化幅度是随初级粒子能量的增加而迅速下降，能谱的变化可近似表示为^[34,43]：

$$\frac{\delta J(E)}{J(E)} = \begin{cases} -a, & \text{对 } E \leq E_1 \\ 0, & \text{对 } E > E_1 \end{cases} \quad (1-10)$$

其中参量 $a \approx 0.08$ ， $E_1 \approx 25-30$ 千兆电子伏。

3.11年变化

早在五十年代，通过资料分析就发现了宇宙线的强度变化同太阳黑子数间存在负相关。现在已经清楚地知道，宇宙线强度具有显著的11年变化，在太阳活动极大年时，宇宙线强度有极小值，在太阳活动极小年时，宇宙线强度有极大值。这种变化与观测点的高度、粒子的成分有关，核成分的变化大于硬成分，高高度的变化大于海平面。11年变化还与地磁

纬度有关，随着地磁纬度的升高，11年变化的幅度亦越大。对于中子成分这种变化在高纬度可达50%以上，而在赤道附近这种变化只有2—3%^[38, 48]。

4. 宇宙线暴 (Forbush) 下降

在大的太阳活动之后，在世界范围内往往出现银河宇宙线强度的突然下降 (12—24小时)，然后缓慢地恢复 (几天到十几天)，人们把这种强度随时间的变化叫做宇宙线暴。因为它是 Forbush 在 1938 年首先发现的，故又称为 Forbush 下降。图 1.6 是我国北京宇宙线观测站中子堆记录的一次宇宙线暴。

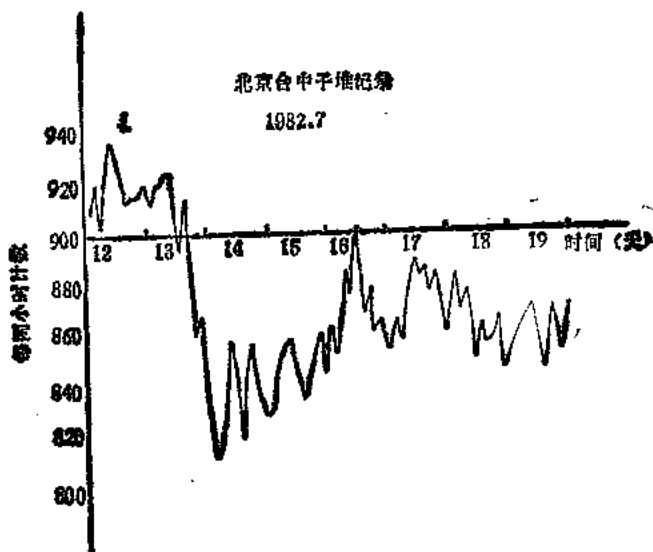


图 1.6 北京宇宙线观测站记录的1982年7月13日的宇宙线暴

宇宙线暴下降的幅度从百分之几到百分之几十不等，它取决于观测点的高度、纬度和测量的成分，即宇宙线暴是能

量或刚度的函数^[51,52]。例如 1978年 2月 15日的宇宙线暴，通过地下、地面和同步卫星的联合观测，其能谱可表示为^[52]

$$J(E) = BE^{-\gamma} \quad (1-11)$$

当能量 E 从 6—300 千兆电子伏变化时， γ 从 0.15—1.45 变化，而 B 是一个尺度参数。

宇宙线暴恢复阶段的特征可用以下指数规律表示：

$$J(t) = J_0 \exp(-t/t_0) \quad (1-12)$$

式中 J_0 是下降的最大幅度， $J(t)$ 是下降前的强度和恢复阶段强度之差， t 是下降开始之后的时间，以天作度量单位， t_0 是恢复特征时间常数，它与能量（刚度）有关。 $R_c \sim 1$ 千兆伏的中子堆， $t_0 = 6.5$ 天， $R_c \sim 15$ 千兆伏时， $t_0 = 3.0$ 天。

宇宙线暴与太阳活动和行星际扰动有紧密的关系，常出现在耀斑之后 2—3 天。空间观测发现，宇宙线暴与行星际磁场的大小和太阳风速度的大小有密切关系^[29,53]。

§ 1.2 太阳宇宙线

1.2.1 概述

太阳宇宙线是太阳发生耀斑时发射出的高能带电粒子流。由于它的绝大部分是由质子组成的，故又常叫做太阳质子事件。能量在数兆电子伏以上的太阳宇宙线使地球极区之上的电离层 D 层电子密度剧增，造成无线电波的强烈吸收，这一现象称为极盖吸收事件（即 PCA 事件）。

太阳宇宙线粒子的能量一般从 10 兆电子伏到大于 1 千兆电子伏，10 兆电子伏以下的太阳粒子称为磁暴粒子，太阳宇宙线按能量可分为千兆电子伏事件和兆电子伏事件，或者把能量高于 0.5 千兆电子伏的太阳宇宙线称为相对论事件。